干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.06.16

祁连山中段青海云杉林土壤肥力质量评价研究①

马 剑[1,2], 刘贤德[1,2], 李 广[1], 赵维俊[2], 王顺利[2], 敬文茂[2], 王荣新[2], 赵永宏[3]

（1 甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070; 2 甘肃省祁连山水源涵养林研究院甘肃省森林生态与冻土水文水资源重点实验室,甘肃 张掖 734000; 3 三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002）

摘 要: 以祁连山排露沟流域青海云杉林为研究对象,研究了海拔梯度上土壤肥力因子的分布特征及变化规律,并运用主成分分析法对青海云杉林土壤肥力状况进行了评价。结果表明:(1)研究区土壤呈碱性,pH值均大于8.0;高海拔地区(3 300 m)含水量达到过饱和状态,各土层含水量均大于100%;随海拔升高,全氮含量呈增大趋势,全钾含量呈减小趋势,而全磷含量呈先减小后增大趋势;不同海拔梯度速效磷含量差异不显著($P>0.05$),海拔3 300 m处速效钾含量显著高于其他海拔段($P<0.05$)。(2) 不同海拔梯度下土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾含量都有明显的"表聚效应",其中3 300 m处0~10 cm土层有机质含量高达325.93 $g\cdot kg^{-1}$,是本海拔段其他土层的1.6~1.8倍,是同土层其他海拔段的1.3~2.0倍。(3) 土壤肥力因子间关系密切,土壤含水量与有机质、全氮呈极显著正相关关系,与土壤容重、pH和全钾呈极显著负相关关系,土壤养分含量之间存在不同程度的显著正相关关系。(4) 不同海拔梯度土壤肥力质量为:3 300 m>3 200 m>3 100 m>3 000 m>2 900 m。

关 键 词: 祁连山; 青海云杉林; 土壤肥力; 主成分分析
文章编号: 1000-6060(2019)06-1368-10(1368~1377)

在森林生态系统中,土壤是维持林木健康生长的基质[1],为森林的存在和发展提供养分元素[2];而土壤肥力作为土壤各种性质的综合表象和本质属性,其质量直接影响着森林的健康状态[3],同时又受到了森林植被的影响。在较少人工干扰的情况下,土壤肥力往往会影响到森林植被的生长和分布[4]。因此,正确认识及客观评价森林土壤对准确认识土壤本质和更好利用土壤资源有着重要的意义,也成为了国内外研究的热点[5-6]。

祁连山作为全球暖化最为敏感的区域之一,其森林生态系统在西北森林生态系统中占有重要地位[7]。近年来,受全球气候变化和人类活动影响,祁连山森林生态系统严重退化,服务功能下降,逆向演化显著,对区域经济发展和生态环境建设产生了负面影响[8]。青海云杉林作为祁连山的建群树种,其林下土壤肥力的高低不仅影响着植被的生长,而且还影响着森林生态系统的健康,因此研究其土壤肥力状况有着重要的科学意义。目前,尽管围绕祁连山青海云杉林土壤已开展了诸多研究[9-13],但是针对青海云杉林土壤肥力质量评价方面的研究却较少[14]。因此,本研究以祁连山排露沟流域不同海拔梯度青海云杉林土壤为研究对象,研究了不同海拔梯度土壤肥力因子的分布特征及变化规律,分析了不同海拔间土壤肥力特征的变化差异,探析了各肥力因子之间的相关关系,并运用主成分分析法对不同海拔梯度青海云杉林进行土壤肥力状况评价,以期为祁连山区植被的恢复与重建、土壤肥力的改良以及脆弱生态系统的改善提供理论参考和数据支撑。

① 收稿日期:2019-03-11; 修订日期:2019-06-19
基金项目:甘肃省自然科学基金重大项目(18JR4RA002);甘肃省自然科学基金项目(17JR5RG351);甘肃省林业科技计划项目(2018kj014,2018kj016)
作者简介:马剑(1986-),男,工程师,博士研究生,主要从事森林土壤生态研究. E-mail: majian0127@126.com
通讯作者:刘贤德(1963-),男,研究员,博士生导师,主要从事森林生态研究. E-mail: shyliuxiande@163.com

1　研究区概况与方法

1.1　研究区概况

选择位于祁连山中段西水林区的排露沟流域(100°17′E,38°24′N)为研究区域,流域总面积为2.85 km^2。年平均气温 -0.6 ~ 2.0 ℃,年均降水量433.6 mm,年均蒸发量1081.7 mm,年平均相对湿度为60%,属高寒半干旱山地森林草原气候[15-16]。流域内植被类型和土壤类型垂直梯度较为明显,海拔从低到高,植被类型依次为山地草原植被、山地森林草原植被、亚高山灌丛草甸植被、高山冰雪植被(图1);土壤类型依次为山地栗钙土、山地灰褐土、亚高山灌丛草甸土、高山寒漠土。其中,山地灰褐土和亚高山灌丛草甸土是生长森林的土壤,山地灰褐土分布在海拔2 600 ~ 3 300 m地带,是乔木林的主要分布带;亚高山灌丛草甸土分布在海拔3 300 ~ 3 800 m亚高山地带,是湿性灌木林的主要分布带(图2)。青海云杉作为祁连山的建群树种,呈斑块状或条状分布在海拔2 600 ~ 3 300 m阴坡和半阴坡地带,与阳坡草地交错分布;灌木优势种有金露梅

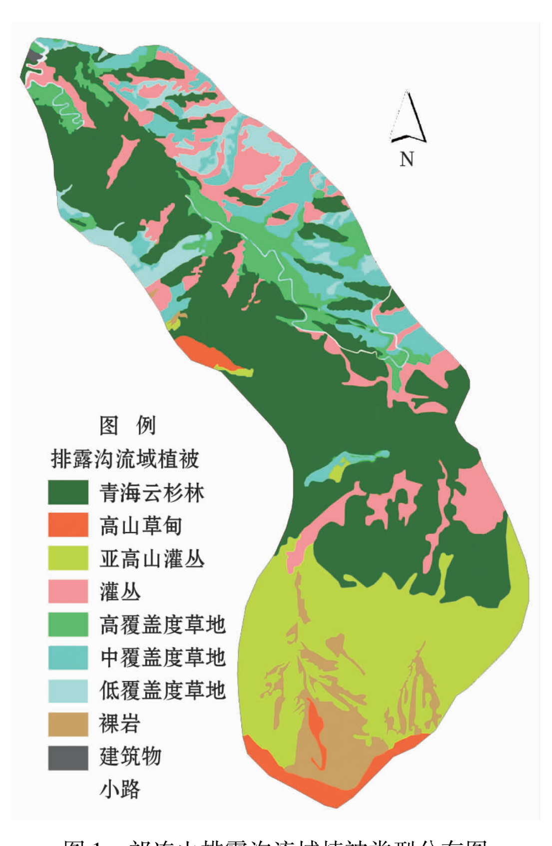


图1　祁连山排露沟流域植被类型分布图

Fig. 1　Vegetation types in Pailugou Catchment of Qilian Mountains

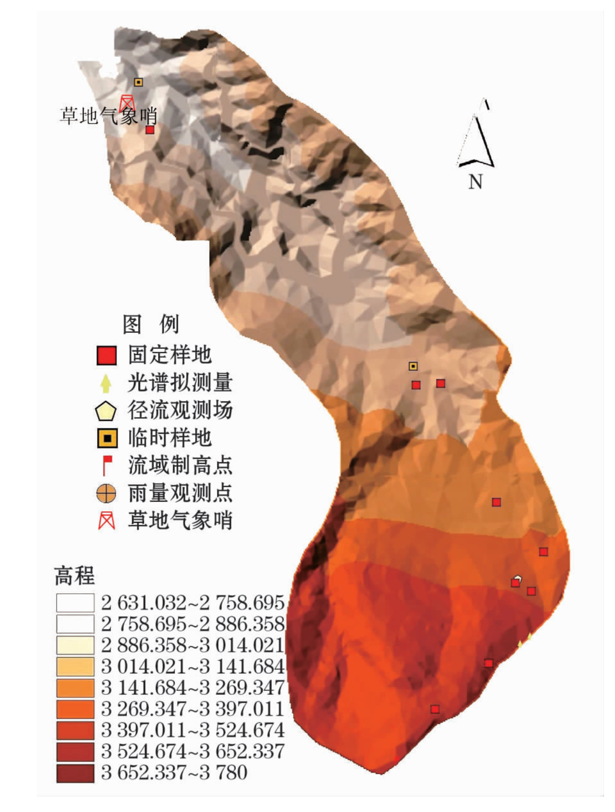


图2　祁连山排露沟流域数字高程图

Fig. 2　Digital elevation in Pailugou Catchment of Qilian Mountains

(*Potentillafruticusa*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)和吉拉柳(*Salix gilashanica*)等,草本主要有珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、黑穗苔(*Carex atrata*)和针茅(*Stipa sp*)等[17]。

1.2　样地布设

选择青海云杉群落为研究对象,以海拔2 900 m为基点,采用梯度格局法,自下而上沿海拔2 900 m、3 000 m、3 100 m、3 200 m和3 300 m与等高线平行各设置1条平行样带,共5条平行样带,样带宽20 m,同时垂直3 300 m高山林线沿坡面垂直向下设置3条样带,样带宽也是20 m,在纵横设置的样带交汇处设置15个样地,样地面积大小为20 m×20 m,样地基本信息见表1。样地调查内容包括:海拔、经纬度、坡度、坡向、灌木盖度、草本种类、草本盖度等。

1.3　样品采集和处理

2015年8月在每个海拔段的3个样地内以"之"字形路线进行土样采集,总共选择4个采样点,每个采样点用200 cm^3环刀分4层(0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm和40 ~ 60 cm)自下而上采集土样,用贴有标签的密封袋带回,用于土壤容重和含水量测定。同时,在每个采样点分别取0 ~ 10 cm、

表 1 不同海拔样地概况

Tab. 1 Survey of sample at different altitudes

样地号	土壤类型	海拔 / m	地理位置	坡度 /°	坡向 /°	灌层覆盖度 / %	活地被层(草、苔藓、地衣)覆盖度 / %
A1,B1,C1	森林灰褐土	3 292	100°18′15″E 38°32′08″N	34	20,15,23	60,70,85	70,80,98
A2,B2,C2	森林灰褐土	3 200	100°18′15″E 38°32′13″N	33	10,11,15	40,2,15	60,75,60
A3,B3,C3	森林灰褐土	3 100	100°17′49″E 38°32′41″N	18	20,20,20	15,7,18	50,85,95
A4,B4,C4	森林灰褐土	3 000	100°17′49″E 38°32′41″N	18	20,23,23	15,1,18	20,95,95
A5,B5,C5	森林灰褐土	2 900	100°18′06″E 38°32′42″N	25	330,330,330	10,10,10	30,30,30

10～20 cm、20～40 cm 和 40～60 cm 土层土样，然后放在塑料布上，将植被残根、石砾等杂物剔除并混匀，装入密封袋带回实验，经风干去除杂质后，磨细过 1 mm 和 0.149 mm 的土壤筛，测定土壤 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾等指标[18－19]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 对野外调查及室内测定数据进行整理、计算，再用 SPSS 20.0 和 Origin 9.0 进行统计分析和绘制图表。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力指标的统计分析

不同海拔梯度 0～60 cm 土层理化指标描述性统计见表 2。由表可知，随海拔升高，土壤含水量呈增大趋势，各海拔段土壤含水量均大于 50%，其中海拔 3 300 m 处土壤水分达到过饱和状态，且与其它海拔差异显著($P<0.05$)。土壤容重随海拔升高整体上呈减小趋势，海拔 2 900 m 和 3 000 m 处土壤容重显著高于其他高海拔区域($P<0.05$)，而海拔 3 100 m、3 200 m 和 3 300 m 之间差异不显著($P>0.05$)。这主要是因为随海拔升高，人为活动不断减少，活地被层盖度的增加使得有机质含量不断增加，土壤容重减小，土壤含水量增加，这与李晓佳[20]在大青山的研究结果一致。

整个研究区土壤基本呈碱性，pH 值均大于 8.0，随海拔升高，pH 值总体上呈减小趋势。这一研究结果与姜林等[21]在祁连山西水林区的研究结果一致，这是因为在该研究区域土壤盐基饱和度较高，造成了土壤含有较多的盐分，使其土壤呈碱性。此外，当海拔升高时，降水量增加，土壤淋溶作用加强，土壤复合体吸附了更多的H^+，导致土壤碱性随海拔升

表 2 不同海拔梯度土壤理化性质描述性统计(0～60 cm)

Tab. 2 Descriptive statistics and characteristics of soil physico-chemical properties in different altitudes(0～60 cm)

海拔 / m	含水量 / %	容重 / cm^{-3}	pH	有机质 / $g \cdot kg^{-1}$	全氮 / $g \cdot kg^{-1}$	全磷 / $g \cdot kg^{-1}$	全钾 / $g \cdot kg^{-1}$	速效磷 / $mg \cdot kg^{-1}$	速效钾 / $mg \cdot kg^{-1}$
2 900	58.17c	0.72a	8.24ab	121.36c	3.09d	0.67ab	17.06a	15.85a	115.27b
3 000	60.17bc	0.61b	8.31a	170.83b	3.63bc	0.57c	14.93b	17.62a	98.29b
3 100	72.77b	0.49c	8.22ab	184.97ab	3.52c	0.62bc	14.09b	12.27a	123.41b
3 200	95.77a	0.53bc	8.15ab	203.56ab	3.96b	0.63abc	11.44c	11.08a	106.50b
3 300	109.70a	0.46c	8.11b	232.78a	4.39a	0.70a	12.12c	15.97a	209.52a
极小值	49.45	0.41	8.05	81.26	2.69	0.54	11.07	6.91	75.03
极大值	116.69	0.76	8.39	253.59	4.53	0.77	17.43	23.84	261.70
均值	79.32	0.56	8.21	182.70	3.72	0.64	13.93	14.56	130.01
标准差	21.95	0.11	0.11	44.51	0.49	0.06	2.17	5.85	57.25
偏度	0.31	0.58	0.13	－0.49	－0.24	0.38	0.21	0.27	1.07
峰度	－1.31	－0.98	－1.26	1.05	－0.09	0.21	－1.16	－1.31	0.28
变异系数 / %	27.67	19.10	1.33	24.36	13.21	9.50	15.60	40.16	44.03

注：不同小写字母表示不同海拔梯度上差异显著($P<0.05$)

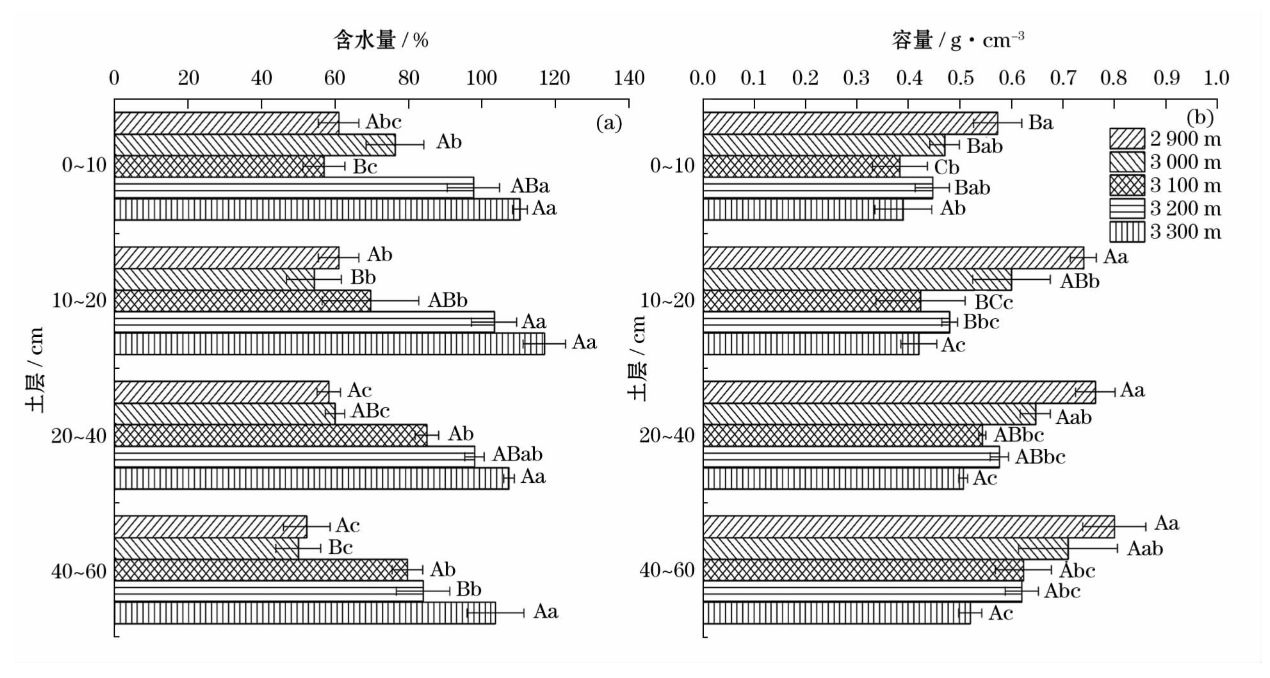
高而降低。

森林土壤的养分状况是衡量土壤肥力的重要因子,本研究就土壤有机质、氮、磷、钾等重要指标进行了分析。在分析中发现,当随海拔升高时,土壤有机质和全氮含量呈逐渐增大趋势,全钾含量呈逐渐减小趋势,而全磷含量呈波动性增加趋势,其最小值出现在 3 000 m 处,最大值出现在高海拔区域(3 300 m)。这是因为高海拔地段,林地温度相对较低,使土壤微生物和土壤酶活性受到了一定程度的抑制,导致土壤有机质分解速度变慢,周转时间变长,土壤养分易于积累。另外,高海拔地段,植被覆盖度较高,大量掉落物的积累,也导致了养分的积累,这与马国飞等[22]在托木尔峰、赵超[23]在大岗山的研究结果一致。全钾含量变化趋势与其他养分相反,这可能与随着海拔升高降雨量不断增加所导致的雨水淋溶作用加强有关,同时也可能与土壤有机质对矿物钾的“稀释效应”有关[24]。速效磷含量在各个海拔段差异不显著($P>0.05$),速效钾含量在 3 300 m 处显著高于其他海拔段($P<0.05$),而其余海拔段之间差异并不显著($P>0.05$)。研究还发现,在所有指标中土壤速效磷、速效钾的变异系数较大,分别为 40.16% 和44.03%,而 pH 值变异系数最小,仅为1.33%,可能与地形、土壤层次性及不同海拔小气候等有关。

2.2　土壤剖面肥力因子分布特征

不同海拔梯度各土层土壤含水量分布特征见图 3a,由图可知,各土层土壤含水量整体上随海拔升高而增大。海拔 3 000 m 处,地表覆盖物以苔藓和地衣为主,保水能力较强,增加了表土层湿度,使得0 ~ 10 cm 土层含水量显著高于 40 ~ 60 cm 土层;海拔 3 100 m处,20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层含水量显著高于 0 ~ 10 cm 土层,而与 10 ~ 20 cm 土层差异不显著($P>0.05$),主要是因为该海拔段岩石较多,土层疏松,土壤水分以大孔隙流为主,水分到达相对不透水层开始蓄积,致使相对不透水层土壤含水量显著高于近地表层土壤;海拔 3 200 m 处,只有 10 ~ 20 cm处含水量显著高于 40 ~ 60 cm 土层,其余土层间差异不显著($P>0.05$),是由于该海拔段活地被层总盖度较高,对表层土壤保护力较强,蒸发量较少;海拔 2 900 m 和 3 300 m 处,各土层间含水量差异不显著($P>0.05$)。

不同海拔梯度各土层土壤容重分布特征见图 3b,由图可以看出,不同海拔段各土层容重存在差异,随着海拔升高,各土层容重整体上呈增大趋势。海拔 2 900 ~ 3 200 m 处 0 ~ 10 cm 土层容重低于其他土层,而 3 300 m 处各土层容重差异较小,且不显著($P>0.05$),其原因为 3 300 m 处人类活动较少,岩石含量高,致使各土层间差异不显著。总体看来,



注:不同大写字母表示同一海拔不同土层之间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一土层不同海拔之间差异显著($P<0.05$),下同

图 3　不同海拔梯度各土层土壤含水量及容重分布特征

Fig. 3　Distribution characteristics of soil water content and bulk density indifferent soil layers at different altitudes

同一海拔段表层土壤容重小于下层土壤，这可能是随土层加深，有机质含量逐渐减小，土壤孔隙度逐渐减小，相应的土壤容重也不断减小，这与万丹等[25]在西藏色季拉山的研究结论相一致。

图 4 为各土层 pH 值和有机质含量在不同海拔梯度上的分布图，0 ~ 10 cm 土层，海拔3 100 m 处 pH 值显著高于 3 200 m 和 3 300 m（$P<0.05$），而与 2 900 m 和 3 000 m 处差异不显著（$P>0.05$）；10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40cm 土层，各海拔段 pH 值间差异不显著（$P>0.05$）；40 ~ 60 cm 土层，海拔 3 300 m 处土壤 pH 值显著低于 3 000 m 和 3 100 m处（$P<0.05$），其他海拔间差异不显著（$P>0.05$）。土壤有机质的较大值均分布在各海拔段的 0 ~ 10 cm 土层，而其他土层间差异并不显著（$P>0.05$），这主要是因为该土层受植被凋落物影响较大，腐殖质含量较高。高海拔区域有机质含量普遍较高，尤其是 3 300 m 处 0 ~ 10 cm 土层有机质含量高达 325.93 g · kg^{-1}，是本海拔段其他土层的 1.6 ~ 1.8 倍，是同土层其他海拔段的 1.3 ~ 2.0 倍。由此可见，在祁连山中段青海云杉林的经营管理过程中，尽量避免过度放牧或人为活动对森林结构造成的破坏，减少掉落物损失，增加土壤含水量和有机质含量，提高森林土壤肥力质量，以改善林分整体的肥力状况。

土壤全量养分标志着土壤养分供应的最大潜力，随着全量养分的生物学富集，土壤肥力会不断提高，而速效养分则标志着能为植物直接吸收利用的养分供应能力[26]。图 5 和图 6 为各海拔段各土层土壤氮、磷、钾含量分布特征。由图可知，全磷含量在各海拔段的变化幅度小，其变化范围为 0.517 ~ 0.823 g · kg^{-1}，全磷含量随土层加深均有不同程度的降低，表现出一定的表聚现象。各土层速效磷含量在各海拔段上的变异较大，其变化范围为6.11 ~ 26.97 g · kg^{-1}，且表聚现象明显；海拔 3 100 m 和 3 300 m处，0 ~ 10 cm 土层速效磷含量显著高于其他土层（$P<0.05$）。各土层全钾含量随海拔升高显著降低，同一海拔不同土层间差异不显著（$P>0.05$），而速效钾含量表现出海拔间差异不显著（$P>0.05$），0 ~ 10 cm 土层含量普遍显著高于其他土层，也表现出明显的表聚现象，尤其是 3 300 m 处含量高达 416.44 g · kg^{-1}，是其他土层的 3.0 ~ 4.2 倍，是同土层其他海拔段的1.7 ~ 3.1 倍。全氮含量在各海拔段均随土层的加深而减小，3 300 m 处 0 ~ 10 cm 土层全氮含量最高，为 4.90 g · kg^{-1}，显著高于其它土层及海拔段的含量。与土壤有机质相比，在一定范围内氮、磷、钾更容易得到迅速补充。当植被覆盖度较高时，每年都会产生大量的枯枝落叶及腐烂根系，经微生物腐解后形成大量的腐殖质，使土

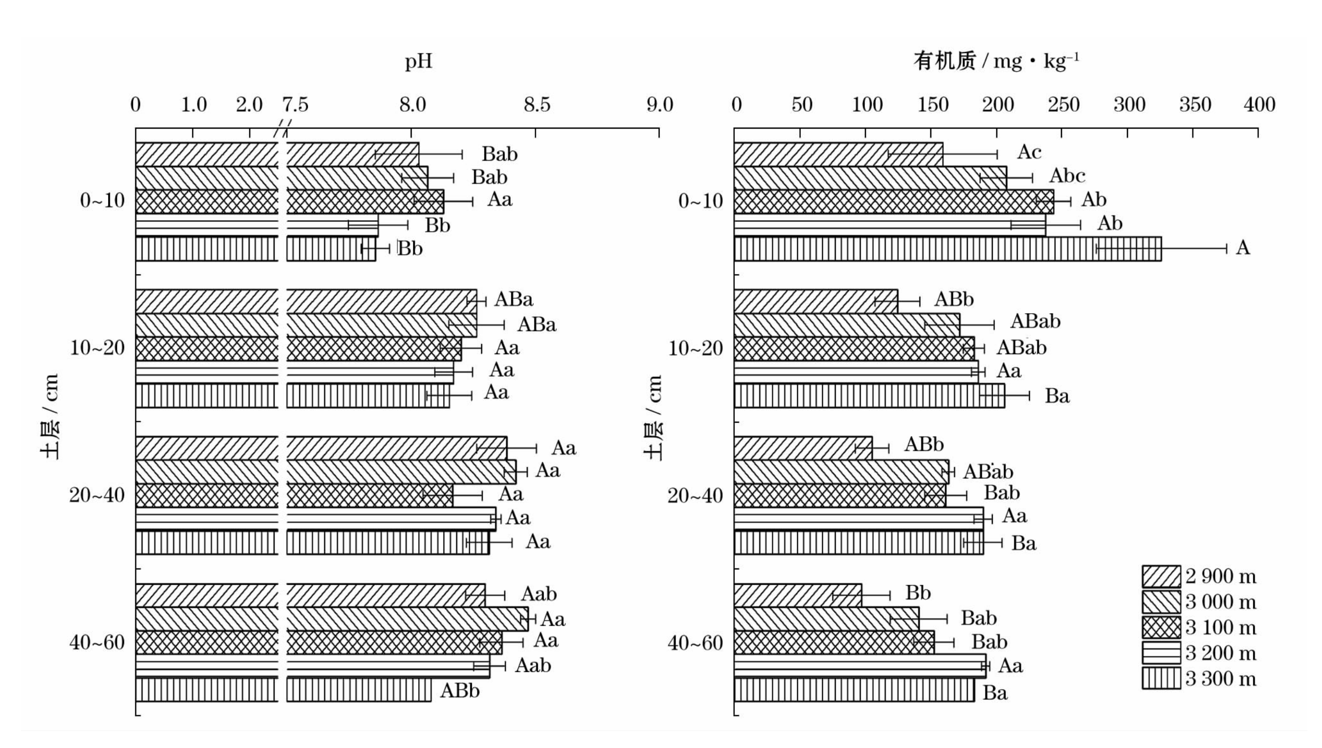


图 4　不同海拔梯度各土层土壤 pH 及有机质分布特征

Fig. 4　Distribution characteristics of soil pH and organic matter in different soil layers at different altitudes

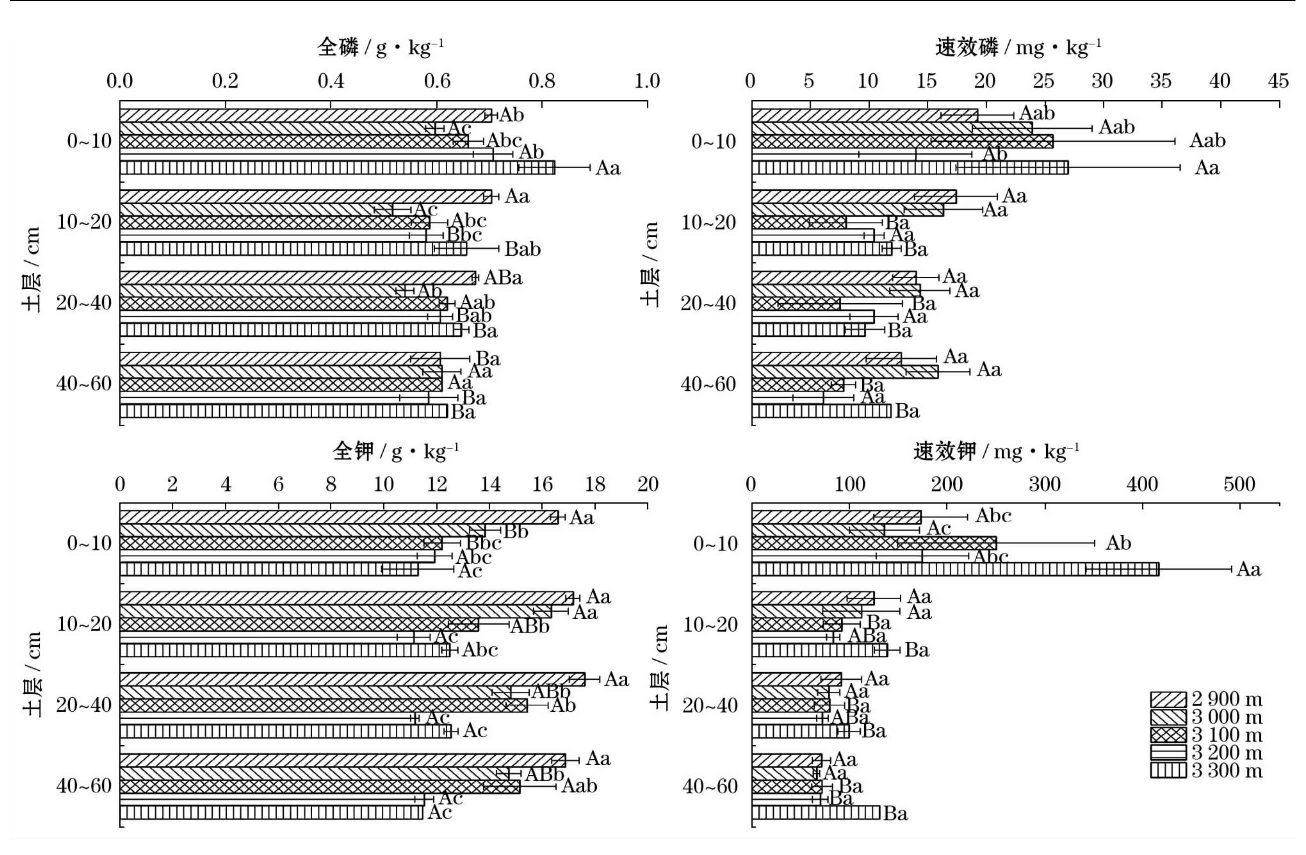


图 5　不同海拔梯度各土层土壤磷和钾分布特征

Fig. 5　Distribution characteristics of soil P and K in different soil layers at different altitudes

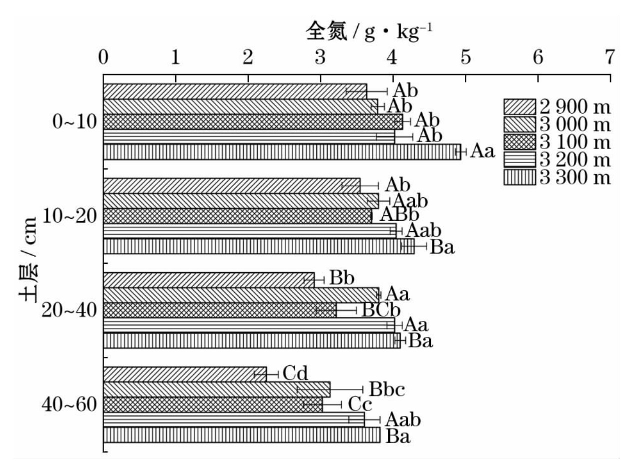


图 6　不同海拔梯度各土层土壤全氮分布特征

Fig. 6　Distribution characteristics of soil N in different soil layers at different altitudes

壤有机质增加,同时释放大量的养分元素,致使表层土壤肥力较高。

2.3　土壤肥力质量评价

2.3.1　土壤肥力质量评价因子相关性分析　由表 3 可以看出,0 ~60 cm 土壤肥力因子之间关系密切。其中土壤含水量与有机质、全氮含量之间呈极显著正相关,与土壤容重、pH 值和全钾含量之间呈极显著负相关。土壤容重与全钾含量之间呈极显著正相关,与有机质和全氮含量呈极显著负相关。pH 值受各项指标影响较小,仅与土壤含水量呈极显著负相关。土壤有机质与含水量、全氮含量呈极显著正相关,即有机质含量越高、土壤含水量、全氮含量也越高,这也能够解释土壤含水量、全氮含量的变化趋势与有机质变化趋势一致的现象;与土壤容重、全钾含量呈极显著负相关。全氮含量与速效钾含量呈显著正相关,与全钾含量呈极显著负相关。全磷仅受速效钾含量的影响,与其呈极显著正相关。速效钾含量受全氮、全磷含量的影响较大,与二者分别呈显著、极显著正相关关系。由此可见,土壤中各肥力因子之间存在一定的相关性,其中单一因子的变化,将会引起其他肥力因子的改变。

2.3.2　土壤肥力质量评价因子主成分分析　采用主成分分析法对研究区不同海拔青海云杉林土壤肥力进行综合评价(表 4)。据主成分累积贡献率达到 85% 为宜的原则[27],因此选取前 3 个特征值,即前 3 个主成分,其中第 1 主成分的特征值为 4.809,其方差贡献率达到 53.433% 。第 2、3 主成分的特征值分别为1.997、1.085,方差贡献率分别为22.184%

表 3　土壤理化指标间的相关系数

Tab. 3　Correlation coefficients between soil physical and chemical indexes

相关系数	含水量	容重	pH 值	有机质	全氮	全磷	全钾	速效磷
容重	-0.676**							
pH 值	-0.710**	0.335						
有机质	0.690**	-0.677**	-0.399					
全氮	0.811**	-0.714**	-0.357	0.870**				
全磷	0.405	-0.195	-0.369	0.325	0.365			
全钾	-0.805**	0.694**	0.415	-0.854**	-0.791**	-0.141		
速效磷	-0.291	0.102	0.443	0.185	0.185	0.421	0.201	
速效钾	0.398	-0.507	-0.105	0.490	0.523*	0.712**	-0.293	0.495

注：* 表示相关性显著($P<0.05$)，** 表示相关性极显著($P<0.01$)

和 12.053%。分析发现前 3 个主成分的方差贡献率累计值达到了 87.671%，这说明前 3 个主成分包含了研究所涉及评价因子的基本信息，可以用于评价土壤肥力质量。

表 4　总方差分析表

Tab. 4　Interpretation of total variance

成份	初始特征值			提取平方和载入		
	特征根	贡献率 / %	累积贡献率 / %	特征根	贡献率 / %	累积贡献率 / %
1	4.809	53.433	53.433	4.809	53.433	53.433
2	1.997	22.184	75.617	1.997	22.184	75.617
3	1.085	12.053	87.671	1.085	12.053	87.671
4	0.504	5.604	93.274			
5	0.238	2.646	95.921			
6	0.197	2.185	98.106			
7	0.129	1.431	99.537			
8	0.030	0.334	99.871			
9	0.012	0.129	100.000			

表 5　成分得分系数矩阵

Tab. 5　Coefficient matrix of composition scores

指标	主成份		
	F_1	F_2	F_3
含水量(X_1)	0.102	0.031	-0.267
容重(X_2)	-0.259	0.083	-0.081
pH 值(X_3)	0.142	-0.134	0.586
有机质(X_4)	0.276	-0.023	0.138
全氮(X_5)	0.263	0.003	0.120
全磷(X_6)	-0.210	0.528	-0.276
全钾(X_7)	-0.300	0.173	-0.053
速效磷(X_8)	0.030	0.296	0.401
速效钾(X_9)	0.017	0.363	0.062

用 F_i 表示第 i 个主成分，用 X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、X_8、X_9 分别表示土壤含水量、容重、pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾(表 5)。那么 3 个主成分的表达式分别为：

$$F_1=0.102X_1-0.259X_2+0.142X_3+0.276X_4+0.263X_5-0.210X_6-0.300X_7+0.030X_8+0.017X_9$$

$$F_2=0.031X_1+0.083X_2-0.134X_3-0.023X_4+0.003X_5+0.528X_6+0.173X_7+0.296X_8+0.363X_9$$

$$F_3=-0.267X_1-0.081X_2+0.586X_3+0.138X_4+0.120X_5-0.276X_6-0.053X_7+0.401X_8+0.062X_9$$

土壤容重、有机质、全氮和全钾在第 1 主成分上的载荷绝对值较大，这说明土壤容重、有机质、全氮含量和全钾含量显著影响着土壤肥力水平，其中有机质和全氮为正值，在一定范围，土壤有机质和全氮含量越高，土壤的肥力质量就越好；而土壤容重和全钾含量为负值，说明随着土壤容重和全钾含量的增加，土壤的肥力质量下降。

在第 2 主成分表达式中，全磷、速效磷和速效钾的载荷值较大，且均为正值，表明它们的含量越高，土壤肥力质量也越好。

在第 3 主成分表达式中，土壤含水量和 pH 值的系数绝对值较大，其中 pH 值为正值，且载荷值最大，说明 pH 值对土壤肥力水平有较为显著的影响，pH 值越高，其肥力质量越好。

利用以上表达式分别求出 3 个主成分的得分，然后再以各主成分的方差贡献率为权数进行加权求和，得到各海拔段土壤肥力综合得分，鉴于每个海拔梯度有 3 块样地(表 1)，为了更好地反应各海拔段的肥力情况，根据不同海拔段青海云杉林 3 块样地得分的平均值计算得出各海拔段的土壤肥力综合指数(表 6)。结果表明土壤肥力质量高低顺序：3 300 m > 3 200 m > 3 100 m > 3 000 m > 2 900 m。其中海

表 6　不同海拔青海云杉林土壤肥力质量综合得分

Tab. 6　Comprehensive scores of soil fertility quality of Picea crassifolia in different altitude

海拔/m	F_1	F_2	F_3	综合得分	平均得分	排名
3 300	1.183	0.891	-0.884	0.720	0.690	1
	1.101	2.254	0.254	1.120		
	0.660	0.070	-1.112	0.230		
3200	0.593	-0.580	-1.003	0.070	0.203	2
	0.873	-1.509	0.119	0.150		
	0.644	0.445	-0.418	0.390		
3100	0.289	-1.249	0.055	-0.120	-0.033	3
	-0.422	-0.682	-1.382	-0.540		
	0.398	0.734	1.496	0.560		
3000	0.202	-0.381	1.299	0.180	-0.057	4
	-0.394	-1.098	0.086	-0.440		
	-0.037	-0.591	2.027	0.090		
2900	-1.981	0.545	0.170	-0.920	-0.803	5
	-1.707	0.367	-0.847	-0.930		
	-1.403	0.784	0.140	-0.560		

拔 2 900 m 土壤肥力质量最差,这可能是因为在低海拔段,人为活动频繁,对林地造成了一定程度的破坏,使得土壤养分流失;同时低海拔处气温高、热量比较充足,微生物的活动强烈,土壤养分不易积累,加之植被群落丰富度高,对养分利用率高,导致该海拔段土壤质量降低。而随着海拔梯度的升高,土壤肥力不断增加,3 300 m 处土壤肥力最好,这一现象的发生与青海云杉林地处亚高寒山地有直接的关系,随海拔升高,人类活动相对较少,且林地的降雨不断增加,气温不断降低,使土壤动物和微生物的活动强度下降,养分得到不断积累。

祁连山中段青海云杉林建设是祁连山林业生态体系建设和河西走廊经济发展的重要基础,应强化该区域森林生态的保护管理,减少林木砍伐、过度放牧、人为踩踏破坏,保证土壤的肥力。亦可采取封山育林、优化管理等措施,增加地被覆盖度,提高森林水源涵养功能,促进森林土壤—植被的养分循环与高效利用,形成生态体系内物质能量的良性循环,实现可持续发展。

3　结 论

(1) 祁连山排露沟流域青海云杉林土壤属于碱性土壤,且随海拔和土层变化差异不大;随着海拔的升高,土壤含水量、有机质和全氮含量逐渐增大;容重、全钾含量逐渐减低;全磷含量先减小后增大;速效磷含量在各个海拔段差异不显著,速效钾含量在 3 300 m 处显著高于其他海拔段。

(2) 海拔 2 900 m 和 3 300 m 处,各土层土壤含水量差异不显著;海拔 3 000 m 和 3 200 m 处表层土壤(0 ~ 10 cm)含水量显著高于其他土层,在海拔 3 100 m处表层土壤(0 ~ 10 cm)含水量则低于其他土层;不同海拔段土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾都具有"表聚效应",其中 3 300 m 处 0 ~ 10 cm 土层有机质含量高达 325.93 g · kg^{-1},是本海拔段其他土层的 1.6 ~ 1.8 倍,是同土层其他海拔段的 1.3 ~ 2.0 倍。

(3) 土壤肥力因子间关系较为密切。其中土壤含水量与有机质、全氮含量之间呈极显著正相关,与土壤容重、pH 值和全钾含量间呈极显著负相关,土壤容重与全钾含量间呈极显著正相关,与有机质和全氮含量呈极显著负相关;土壤养分含量之间关系显著。

(4) 通过主成分分析计算得到不同海拔青海云杉林土壤肥力质量顺序为:3 300 m > 3 200 m > 3 100 m > 3 000 m > 2 900 m。高海拔土壤肥力状况较低海拔好,这也是研究区青海云杉林上线不断上升的原因之一。所以,在青海云杉林的经营、管理中,应尽量地减少人为活动对低海拔段林地的破坏,从而改善低海拔段土壤肥力状况,促进植被的正向演替,进而提高其林地土壤肥力。

参考文献(References)

[1] 杨晓娟,王海燕,刘玲,等. 东北过伐林区不同林分类型土壤肥力质量评价研究[J]. 生态环境学报,2012,21(9):1553 - 1560. [YANG Xiaojuan, WANG Haiyan, LIU Ling, et al. Evaluation of soil fertility quality under different forest stands in over-logged forest region, northeast China[J]. Ecology and Environmental Sciences,2012,21(9):1553 - 1560.]

[2] 邓小军,陈晓龙,唐健,等. 基于 Nemerow 法的森林土壤肥力综合指数评价[J]. 草业学报,2016,25(7):34 - 41. [DENG Xiaojun, CHEN Xiaolong, TANG Jian, et al. Assessment of forest soil fertility using an integrated index based on the Nemerow method [J]. Acta Prataculturae Sinica,2016,25(7):34 - 41.]

[3] GOSLING P, SHEPHERD M. Long-term changes in soil fertility in organic arable farming systems in England, with particular reference to phosphorus and potassium[J]. Agriculture Ecosystems & Environment,2005,(105):425 - 432.

[4] 李静鹏,徐明锋,苏志尧,等. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J]. 生态学报,2014,34(9):2297 - 2307. [LI Jingpeng, XU Mingfeng, SU Zhiyao, et al. Soil fertility quality assessment un-

der different vegetation restoration patterns[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(9):2297－2307.]

[5] MA Q,YU W T,ZHAO S H,et al. Comprehensive evaluation of cultivated black soil fertility[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2004,15(10):1916－1920.

[6] ANDREWS S S,KARLEN D L,CAMBARDELLA C A. The soil management assessment frame work:A quantitative soil quality evaluation method[J]. Soil Science Society of America Journal,2001,(68):1945－1962.

[7] 张珊,李玉,车克钧,等. 祁连山东段青海云杉林区土壤氮矿化与土壤因子的相关性[J]. 水土保持学报,2016,30(5):218－223.[ZHANG Shan,LI Yu,CHE Kejun,et al. Study on the relationship between soil nitrogen mineralization of *Picea crassfolia* forest and soil factors in the eastern of Qilian Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(5):218－223.]

[8] 李雯靖,王立,赵维俊,等. 祁连山青海云杉林土壤养分特征[J]. 甘肃农业大学学报,2016,51(5):88－94.[LI Wenjing,WANG Li,ZHAO Weijun,et al. Soil nutrient characteristics of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2016,51(5):88－94.]

[9] 刘贤德,赵维俊,张学龙,等. 祁连山排露沟流域青海云杉林土壤养分和 PH 变化特征[J]. 干旱区研究,2013,30(6):1013－1020.[LIU Xiande,ZHAO Weijun,ZHANG Xuelong,et al. Variation of soil in the nutrient content and pH value under *Picea crassifolia* forest in the Pailugou Drainage Basin in the Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research,2013,30(6):1013－1020.]

[10] 车宗玺,刘贤德,车宗奇,等. 祁连山青海云杉林土壤有机质及氮素的空间分布特征[J]. 水土保持学报,2014,28(5):164－169.[CHE Zongxi,LIU Xiande,CHE Zongqi,et al. Spatial distribution characteristics of soil organic matter and nitrogen of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2014,28(5):164－169.]

[11] 赵维俊,刘贤德,徐丽恒,等. 祁连山青海云杉林动态监测样地土壤 pH 和养分的空间异质性[J]. 干旱区地理,2015,38(6):1179－1189.[ZHAO Weijun,LIU Xiande,XU Liheng,et al. Spatial heterogeneity of soil pH and nutrients of a dynamical monitoring plot of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography,2015,38(6):1179－1189.]

[12] 牛赟,刘贤德,苗毓鑫,等. 祁连山大野口流域土壤水热空间变化特征研究[J]. 冰川冻土,2015,37(5):1353－1360.[NIU Yun,LIU Xiande,MIAO Yuxin,et al. Research on the spatial variation characteristics of soil moisture and temperature in Dayekou Basin of the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2015,37(5):1353－1360.]

[13] 张平,刘贤德,车宗玺,等. 祁连山青海云杉林土壤养分异质性分析[J]. 干旱区地理,2012,35(4):594－598.[ZHANG Ping,LIU Xiande,CHE Zongxi,et al. Heterogeneity of soil nutrient of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forest in the Qilian Mountains[J]. Arid land geography,2012,35(4):594－598.]

[14] 齐鹏,刘贤德,赵维俊,等. 祁连山大野口流域青海云杉林土壤肥力评价[J]. 草原与草坪,2015,35(4):37－43.[QI Peng,LIU Xiande,ZHAO Weijun,et al. Evaluation of soil fertility in *Picea crassifolia* forest in Dayekou Basin of Qilian Mountains[J]. Grassland and Turf,2015,35(4):37－43.]

[15] 张立杰,赵文智,何志斌,等. 祁连山典型小流域降水特征及其对径流的影响[J]. 冰川冻土,2008,30(5):776－777.[ZHANG Lijie,ZHAO Wenzhi,HE Zhibin,et al. The characteristics of precipitation and its effects on runoff in a small typical catchment of Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2008,30(5):776－777.]

[16] 刘鹄,赵文智,何志斌,等. 祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性[J]. 生态学报,2008,28(5):2390－2391.[LIU Hu,ZHAO Wenzhi,HE Zhibin,et al. Temporal heterogeneity of soil moisture under different vegetation types in Qilian Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(5):2390－2391.]

[17] 马剑,刘贤德,金铭,等. 祁连山青海云杉林土壤理化性质和酶活性海拔分布特征[J]. 水土保持学报,2019,33(2):207－213.[MA Jian,LIU Xiande,JIN Ming,et al. Soil physicochemical properties and enzyme activities along an altitudinal gradient in *Picea crassifolia* of Qilian Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(2):207－213.]

[18] 张万儒,许本彤. 森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社,1999.[ZHANG Wanru,XU Bentong. Analysis method of forest soil[M]. Beijing:Standards Press of China,1999.]

[19] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.[Soil Society of China. Soil agrochemistry analysis protocoes[M]. Beijing:China Agriculture Science Press,1999.]

[20] 李晓佳. 大青山南北坡不同海拔高度表土理化性质研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2008.[LI Xiaojia. Research of surface soil physical and chemical characteristics at different altitude in south and north foot of Daqing Mountain[D]. Hohhot:Inner Mongolia Normal University,2008.]

[21] 姜林,耿增超,李珊珊,等. 祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布[J]. 生态学报,2012,32(11):3368－3376.[JIANG Lin,GENG Zengchao,LI Shanshan,et al. Soil cation exchange capacity and exchangeable base cation content in the profiles of four typical soils in the Xishui forest zone of the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(11):3368－3376.]

[22] 马国飞,满苏尔·沙比提,张雪琪. 托木尔峰南坡不同植被类型土壤特性及其与海拔的关系[J]. 草业科学,2017,34(6):1149－1158.[MA Guofei,SABIT Mansur,ZHANG Xueqi. Relationship between soil properties in different vegetation types and altitudes on the south slope of Mt. Tuomuer[J]. Pratacultural Science,2017,34(6):1149－1158.]

[23] 赵超. 不同海拔毛竹林土壤特征及肥力评价的研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.[ZHAO Chao. Investigation on soil characteristics and fertility evaluation in different altitude of phyllostachy forest[D]. Beijing:Beijing Forestry University,2011.]

[24] 庞营军,屈建军,陈怀顺,等. 雅鲁藏布江江当宽谷区固沙措施对流沙理化性质的改良效应[J]. 水土保持通报,2016,36(6):67－72.[PANG Yingjun,QU Jianjun,CHEN Huaishun,et al. Improvement effects of sand fixing measures on shifting-sand physical and chemical properties in Jiandang wide valley area of Yarlung Zangbo River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2016,36(6):67－72.]

[25] 万丹,梁博,聂晓刚,等. 西藏色季拉山土壤物理性质垂直地带

性[J]. 生态学报,2018,38(3):1－10. [WAN Dan,LIANG Bo,NIE Xiaogang,et al. Research on vertical zonation of soil physical properties in Sygera Mountain,Tibett[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):1－10.]

[26] 王海燕,雷相东,陆元昌,等. 海南4种典型林分土壤化学性质比较研究[J]. 林业科学研究,2009,22(1):129－133. [WANG Haiyan,LEI Xiangdong,LU Yuanchang,et al. Comparisons of soil chemical properties under four typical forest stands in Hainan Province[J]. Forest Research,2009,22(1):129－133.]

[27] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京:中国人民大学出版社,2009:153－169. [HE Xiaoqun. Multivariate statistical analysis[M]. Beijing:China Renmin University Press,2009:153－169.]

Evaluation on soil fertility quality of *Picea crassifolia* forest in middle Qilian Mountains

MA Jian[1,2], LIU Xian-de[1,2], LI Guang[1], ZHAO Wei-jun[2], WANG Shun-li[2], JING Wen-mao[2], WANG Rong-xin[2], ZHAO Yong-hong[3]

(1 *College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*; 2 *Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Key Laboratory of Hydrology and Water Resources of Forest Ecology and Frozen Soil of Gansu Province, Zhangye* 734000, *Gansu, China*; 3 *College of Water Hydraulic & Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang* 443002, *Hubei, China*)

Abstract: This paper selected *Picea crassifolia* forest which lived in Pailugou Catchment of Qilian Mountains, northwest China as an object, studied the distribution characteristics and variations of soil fertility factors at different altitudes, and evaluated the soil fertility status of *Picea crassifolia* forest by principal component analysis. The results showed as follows: (1) The soil in the study area was alkaline, and the pH value was more than 8.0. The water content of the high altitude area (3 300 m) reached to the supersaturated status, and the water content of each soil layer was more than 100%. With altitude increased, the total nitrogen content gradually increased, the total potassium content gradually decreased, and the total phosphorus content decreased first and then increased. The content of available phosphorus at different altitudes had no obviously difference ($P>0.05$), and the content of available potassium in 3 300 m was significantly higher than that in other altitudes ($P<0.05$). (2) The soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available phosphorus and available potassium in different altitudes had obvious "surface accumulation effect", the organic matter content in 0－10 cm soil layer at 3 300 m was 325.93 $g \cdot kg^{-1}$, which was 1.6－1.8 times higher than that of other soil layers in this altitude, and 1.3－2.0 times higher than other altitude of the same soil layer. (3) Soil fertility factors were closely related, among which soil water content was positively correlated with organic matter and total nitrogen content, negatively correlated with soil bulk density, pH value and total potassium content, and there was a significant positive correlation between soil nutrient content in different degrees. (4) The soil fertility quality rank of different altitudes was 3 300 m > 3 200 m > 3 100 m > 3 000 m > 2 900 m.

Key words: Qilian Mountains; *Picea crassifolia*; soil fertility; principal component analysis